

Temperatuurverandering bij kunstmatige infiltratie

(rapport opgesteld voor de Commissie Infiltratie)

1. Inleiding

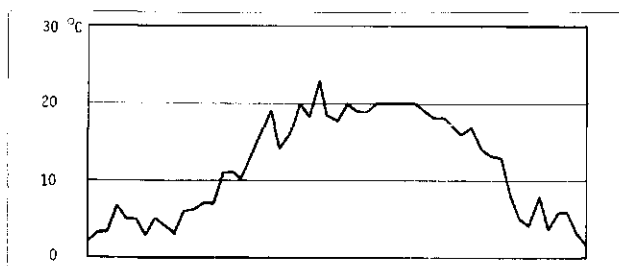
Als grondstof voor de openbare watervoorziening heeft oppervlaktewater onder meer het nadeel dat de temperatuur τ sterk met de seizoenen varieert (afb. 1). Onder natuurlijke omstandigheden kan deze variatie met goede benadering worden weergegeven door (afb. 2)

$$\tau_i = \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0)$$

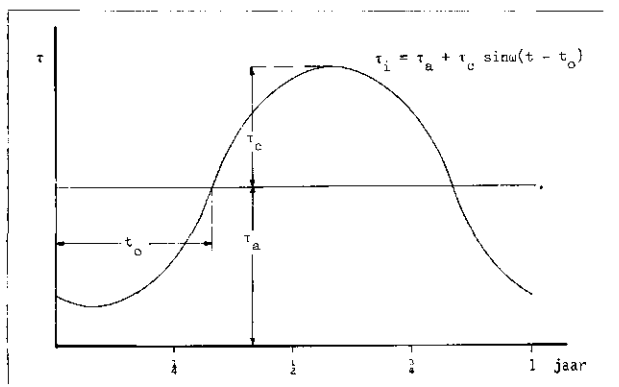
$$\text{met } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ en } T = 1 \text{ jaar} = 31,5 \cdot 10^6 \text{ sec,}$$

terwijl in Nederland τ_a en τ_c beide rond 10°C bedragen en t_0 globaal gelijk is aan 4 maanden. Grondwater heeft volgens ervaring een konstante temperatuur en het ligt dan ook voor de hand om aan te nemen dat bij kunstmatige infiltratie de bovengenoemde temperatuurvariaties zullen worden afgevlakt.

Om de verandering in watertemperatuur bij kunstmatige infiltratie te leren kennen is in [1] een watervoerend

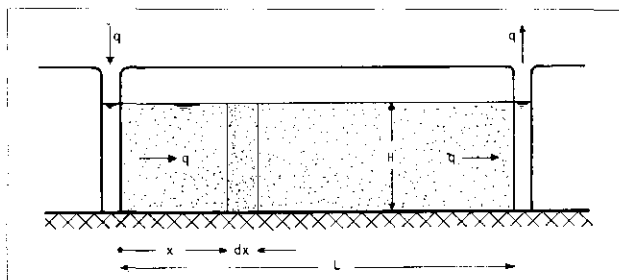


Afb. 1 - Temperatuur van het Rijnwater te Lobith in 1970 (wekelijkse waarnemingen).



Afb. 2 - Geschematiseerd verloop van de rivierwatertemperatuur.

Afb. 3 - Dwarsdoorsnede over infiltratiegebied.



pakket beschouwd (afb. 3), dat aan de linker zijde met rivierwater in een hoeveelheid van $q \text{ m}^3/\text{m, sec}$ wordt gevoed, terwijl aan de rechterzijde eenzelfde hoeveelheid kunstmatig grondwater wordt onttrokken. Wordt voor een grondelement ter lengte dx , hoogte H en eenheid van breedte loodrecht het vlak van tekening de balans van de door het water getransporteerde warmte opgesteld

warmtetoevoer = warmteafvoer + warmteberging

dan geldt voor een tijd dt

$$q\tau\rho_w c_w dt = q\left(\tau + \frac{\delta\tau}{\delta x} dx\right)\rho_w c_w dt + \{pHdx\rho_w c_w + (1-p)Hdx\rho_g c_g\} \frac{\delta\tau}{\delta t} dt$$

waarin p het porienvolume, τ de (gelijke) temperatuur van water en korrels, ρ_w en ρ_g respectievelijk c_w en c_g de soortelijke dichtheid en de soortelijke warmte van water en korrelmateriaal voorstellen. Met ρ_s en c_s als soortelijke dichtheid en soortelijke warmte van de grond

$$\rho_s = p\rho_w + (1-p)\rho_g$$

$$\rho_s c_s = p\rho_w c_w + (1-p)\rho_g c_g$$

geldt na vereenvoudiging

$$\frac{\delta\tau}{\delta t} = \frac{q}{H} \frac{\rho_w c_w}{\rho_s c_s} \frac{\delta\tau}{\delta x}$$

Voor de randvoorwaarde

$$x = 0, \tau = \tau_i = \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0)$$

heeft deze vergelijking als oplossing

$$x = x, \tau = \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0 - \alpha x)$$

met

$$\alpha = \frac{H}{q} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}$$

Volgens deze uitkomst planten de temperatuurwisselingen in het oppervlaktewater zich zonder enige demping door het grondmassief voort. Er treedt alleen een vertraging T_d op welke voor een stroomlengte L volgt uit

$$T_d = \alpha L = \frac{HL}{q} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}$$

Met de gemiddelde verblijftijd voor het water in de ondergrond

$$T_a = \frac{\mu HL}{q}$$

waarin μ het werkzaam porienvolume, kan deze vertraging ook worden geschreven als

$$T_d = \frac{T_a}{\mu} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}$$

Voor de Nederlandse duinen, opgebouwd uit fijne en gelijkmatige kwartskorrels geldt

$$p = 0,4 \quad \mu = 0,25$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad c_w = 4190 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_g = 2650 \text{ kg/m}^3, \quad c_g = 780 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_s = 0,4 \cdot 1000 + 0,6 \cdot 2650 = 1990 \text{ kg/m}^3$$

$$c_s = 0,4 \frac{1000}{1990} 4190 + 0,6 \frac{2650}{1990} 780 = 1465 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

waaruit volgt

$$T_d = \frac{T_a}{0,25} \cdot \frac{1990}{1000} \cdot \frac{1465}{4190} = 2,78 T_a$$

en b.v. in de Amsterdamse duinwaterwinplaats met $T_a = 60$ dagen, $T_d = 167$ dagen of bijna een half jaar.

Bij de bovengegeven berekening is stilzwijgend ondersteld, dat de warmte-overgang tussen het water en de korrels in het watervoerende pakket ogenblikkelijk geschiedt. Is dit niet het geval, dan zal naast vertraging ook demping optreden. Door Verruyt [2] is echter reeds berekend dat dit alleen een rol speelt wanneer de korrel-diameter groter is dan 1 m. In Nederland is dit nimmer het geval, doch in het buitenland kan dit bij gespleten rotsformaties een faktor van betekenis zijn.

2. Geleiding

Bij de berekeningen van de vorige paragraaf is intussen alleen het warmtetransport met het stromende water in beschouwing genomen. Doordat de temperatuur van het te infiltreren water ter plaatse $x = 0$ met die van het grondwater ter plaatse $x = x$ verschilt, zal daarnaast echter door convectie een warmtestroom Ω optreden, per eenheid van breedte gelijk aan

$$\Omega = -\lambda_s H \frac{\delta\tau}{\delta x}$$

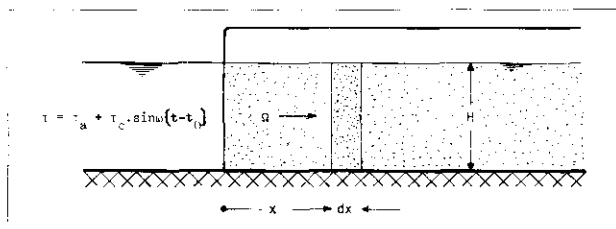
met λ_s als warmtegeleidingscoëfficiënt van de ondergrond. Ter vereenvoudiging van de berekening is in afb. 4 een half-oneindig pakket ondersteld, waarin geen waterstroming aanwezig is. De temperatuurvariatie in het aangrenzende oppervlaktewater

$$\tau_i = \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0)$$

zal zich hierbij uitsluitend door convectie voortplanten. Om deze voortplanting te berekenen kan weer voor een grondelement ter lengte dx , hoogte H en eenheid van breedte de warmtebalans worden opgesteld

$$\Omega dt = \left(\Omega + \frac{\delta\Omega}{\delta x} dx \right) dt + H dx \rho_s c_s \frac{\delta\tau}{\delta t} dt$$

Afb. 4 - Half-oneindig watervoerend pakket zonder stroming.



Vereenvoudigd

$$\frac{\delta\Omega}{\delta x} = -H \rho_s c_s \frac{\delta\tau}{\delta t}$$

en met

$$\Omega = -\lambda_s H \frac{\delta\tau}{\delta x}, \quad \frac{\delta\Omega}{\delta x} = -\lambda_s H \frac{\delta^2\tau}{\delta x^2}$$

$$\frac{\delta^2\tau}{\delta x^2} = \frac{\rho_s c_s}{\lambda_s} \frac{\delta\tau}{\delta t}$$

Voor de randvoorwaarde

$$x = 0, \quad \tau = \tau_i = \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0)$$

heeft deze differentiaalvergelijking als oplossing

$$x = x, \quad \tau = \tau_a + \tau_c e^{-\omega\beta x} \sin \omega(t - t_0 - \beta x)$$

met

$$\beta = \sqrt{\frac{\rho_s c_s}{2\lambda_s \omega}}$$

Voor met water verzadigde zandgrond is hierboven berekend

$$\rho_s = 1990 \text{ kg/m}^3, \quad c_s = 1465 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

terwijl op grond van literatuuropgaven (onder meer [3]) mag worden aangenomen

$$\lambda_s \approx 2,5 \text{ Joule/m, sec, } ^\circ\text{C}$$

Met

$$\omega = \frac{2\pi}{31,5 \cdot 10^6} = 0,20 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

volgt

$$\beta = \sqrt{\frac{1990 \cdot 1465}{2 \cdot 2,5 \cdot 0,20 \cdot 10^{-6}}} = 1,71 \cdot 10^6 \text{ sec/m}$$

en

$$x = x, \quad \tau = \tau_a + \tau_c e^{-0,342x} \sin \omega(t - t_0 - 1,71 \cdot 10^6 x)$$

Ook door convectie zullen de temperatuurwisselingen in het buitenwater zich met grote vertraging door het grondmassief voortplanten, terwijl daarnaast een enorme demping optreedt. Met $10 = e^{2,3}$ zal voor elke $\Delta x = 2,3/0,342 = 6,7$ m de temperatuuramplitudo tot een tiende worden teruggebracht. Na 13,4 is nog slechts een variatie van 1% over, d.w.z. bij een buitenwater-temperatuur tussen 0 en 20 °C (10 ± 10 °C), een grondwater-temperatuur tussen 9,9 en 10,1 °C ($10 \pm 0,1$ °C). In de praktijk is deze convectie dan ook van geen enkele betekenis.

3. Demping

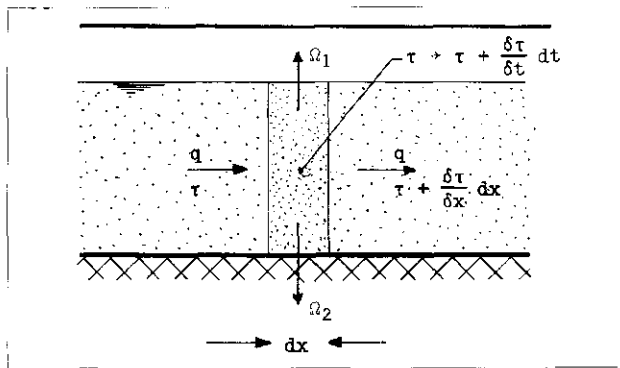
Tussen het buitenwater en het grondmassief treedt een warmte-uitwisseling op, welke volgens paragraaf 2 berekend kan worden als

$$\Omega = -\lambda_s H \frac{\delta\tau}{\delta x}$$

$$\frac{\delta\tau}{\delta x} = -\omega\beta\tau_c e^{-\omega\beta x} \{ \sin \omega(t - t_0 - \beta x) + \cos \omega(t - t_0 - \beta x) \}$$

en ter plaatse $x = 0$

$$\Omega_0 = \omega\beta\lambda_s H \tau_c \{ \sin \omega(t - t_0) + \cos \omega(t - t_0) \}$$



Afb. 5 - Warmtebalans.

Een dergelijke warmtewisseling treedt echter ook op tussen het stromende grondwater van afb. 3 en de daarboven en daaronder gelegen grondpakketten. De warmtebalans van paragraaf 1 behoort dan ook feitelijk te luiden (afb. 5)

toevoer = afvoer + berging + uitwisseling

In formule gedurende een tijd dt

$$q\tau\rho_w c_w dt = q\left(\tau + \frac{\delta\tau}{\delta x} dx\right)\rho_w c_w dt + H dx \rho_s c_s \frac{\delta\tau}{\delta t} dt + \Omega_1 dx dt + \Omega_2 dx dt$$

met Ω_1 en Ω_2 als warmteuitwisseling per oppervlakte-eenheid naar boven en naar beneden

$$\Omega_1, \Omega_2 = \omega\beta\lambda_s\tau_d \{\sin\omega(t-t_0-\alpha x) + \cos\omega(t-t_0-\alpha x)\}$$

en τ_d als temperatuuramplitudo ter plaatse. Het watervoerend pakket wordt aan de bovenzijde begrensd door vochtig zand, waarvoor globaal geldt

$$\rho_s = 1700 \text{ kg/m}^3, \quad c_s = 800 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 0,7 \text{ Joule/m, sec, } ^\circ\text{C}, \quad \beta = 2,2 \cdot 10^6 \text{ sec/m}$$

$$\Omega_1 = 0,31 \tau_d \{\sin\omega(t-t_0-\alpha x) + \cos\omega(t-t_0-\alpha x)\}$$

De ondoorlatende basis bestaat doorgaans uit klei

$$\rho_s = 1500 \text{ kg/m}^3, \quad c_s = 1900 \text{ Joule/kg, } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 0,6 \text{ Joule/m, sec, } ^\circ\text{C}, \quad \beta = 3,4 \cdot 10^6 \text{ sec/m}$$

$$\Omega_2 = 0,41 \tau_d \{\sin\omega(t-t_0-\alpha x) + \cos\omega(t-t_0-\alpha x)\}$$

Gesubstitueerd in de warmtebalans volgt na vereenvoudiging

$$\frac{\delta\tau}{\delta t} = \frac{q}{H} \frac{\rho_w c_w}{\rho_s c_s} \frac{\delta\tau}{\delta x} - \frac{0,72}{H} \frac{\tau_d}{\rho_s c_s} \{\sin\omega(t-t_0-\alpha x) + \cos\omega(t-t_0-\alpha x)\}$$

en met de randvoorwaarde

$$x = 0 \quad \tau = \tau_a + \tau_c \sin\omega(t-t_0)$$

als oplossing

$$x = x \quad \tau = \tau_a + \tau_c e^{-\gamma x} \sin\omega(t-t_0-\alpha x)$$

waarin

$$\tau_c e^{-\gamma x} = \tau_d$$

en

$$\gamma = \frac{0,72}{q} \frac{1}{\rho_w c_w}, \quad \alpha = \frac{H}{q} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w} + \frac{\gamma}{\omega}$$

Voor de reeds geciteerde Amsterdamse duinwaterwinplaats geldt globaal

$$H = 20 \text{ m}, \quad q = 5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dag} = 58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

en

$$\gamma = \frac{0,72}{58 \cdot 10^{-6}} \frac{1}{1000 \cdot 4190} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha = \frac{20}{58 \cdot 10^{-6}} \frac{1990 \cdot 1465}{1000 \cdot 4190} + \frac{3,0 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-6}} =$$

$$240 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3 = 255 \cdot 10^3 \text{ sec/m}$$

Door de warmteuitwisseling met de omgeving neemt de vertraging in de voortplanting van de temperatuurwisselingen een weinig toe, terwijl daarnaast demping optreedt. Over de stroomlengte L van 60 m is deze demping gelijk aan een faktor

$$e^{-\gamma L} = e^{-3,0 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = e^{-0,18} = 0,84$$

hetgeen betekent dat met $\tau_a = \tau_c = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ de temperatuur van het te infiltreren water tussen 0 en $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ varieert en die van het kunstmatig grondwater tussen 1,6 en $18,4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Bij infiltratie op de Veluwe is de reductie in temperatuurwisselingen zelfs nog geringer. Voor een gemiddelde verblijftijd van 1 jaar = 365 dagen geldt bij $H = 150 \text{ m}, \mu = 0,3$

$$q = \frac{\mu HL}{T} = \frac{0,3 \cdot 150 \cdot L}{365} = 0,123 L \text{ en met b.v.}$$

$$L = 1000 \text{ m}, \quad q = 123 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dag} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Voor de demping volgt hiermee

$$\gamma = \frac{0,72}{1,42 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{1000 \cdot 4190} = 0,12 \cdot 10^{-3}$$

$$e^{-\gamma L} = e^{-0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1000} = 0,89$$

en een reductie der temperatuurwisselingen tussen 0 en $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ voor het te infiltreren water tot waarden tussen 1,1 en $18,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ voor het teruggewonnen water.

4. Menging en verdunning

De geringe temperatuurafvlakking bij kunstmatige infiltratie is schijnbaar in tegenspraak met de reeds gememoreerde konstante temperatuur van natuurlijk grondwater. De oorzaak van deze discrepantie moet worden gezocht in het verschil in verblijftijden, bij het infiltratieschema van afb. 3 voor alle waterdeeltjes gelijk en bij de grondwaterwinplaats van afb. 6 voor alle waterdeeltjes verschillend. Een regendropfel welke in afb. 6 ter plaatse $x = x$ met een temperatuur

$$\tau_i = \tau_a + \tau_c \sin\omega(t-t_0)$$

omlaagzakt, bereikt de draineerleiding na een verblijftijd

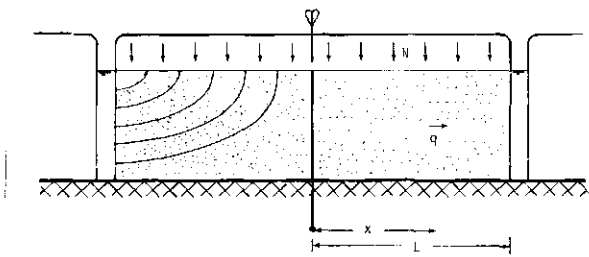
$$T_d = \frac{\mu H}{N} \ln \frac{L}{x}$$

en heeft volgens par. 1 dan een temperatuur

$$\tau = \tau_a + \tau_c \sin\omega(t-t_0-T_d)$$

met

$$T_d = \frac{T_a}{\mu} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w} = \frac{H}{N} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w} \ln \frac{L}{x} = \alpha' \ln \frac{L}{x}$$



Afb. 6 - Winsting van natuurlijk grondwater.

De gemiddelde temperatuur van het uitstromende grondwater kan door integratie worden gevonden

$$\tau_r = \frac{1}{L} \int_0^L \left\{ \tau_a + \tau_c \sin \omega(t - t_0 - \alpha' \ln \frac{L}{x}) \right\} dx$$

en bedraagt

$$\tau_r = \tau_a + \frac{\tau_c}{\sqrt{1 + \omega^2 \alpha'^2}} \sin \omega(t - t_0 - t_d)$$

met

t_d gegeven door de betrekking

$$\operatorname{tg} \omega t_d = \omega \alpha'$$

De geringste demping treedt op wanneer α' klein is, dit wil zeggen bij een sterke voeding door nuttige neerslag en een geringe dikte van het watervoerende pakket. Met b.v. $H = 10$ m en $N = 0,5$ m/jaar geldt met de reeds gebruikte getalconstanten

$$\omega \alpha' = 2\pi \frac{10}{0,5} \frac{1990}{1000} \frac{1465}{4190} = 87,4$$

waaruit een faseverschuiving van bijna $\frac{1}{4}$ jaar en een temperatuuramplitudo van 1,1 % der oorspronkelijke waarde volgt. Een temperatuur van $10 \pm 0,1$ °C mag echter wel als konstant worden beschouwd.

De bovenomschreven temperatuurafvlakking door menging van stroomdraden met een verschillende ouderdom voor het aangevoerde water treedt ook bij kunstmatige infiltratie op. In afb. 3 is de verblijftijd in de ondergrond niet voor alle waterdeeltjes dezelfde, maar zal onder meer door wisseling in de lengten der stroomdraden en door variatie in de grootte van de doorlatendheidscoëfficiënt steeds een zekere spreiding vertonen.

Door een oordeelkundige plaatsing van infiltratie- en winningsmiddelen ten opzichte van elkaar kan deze spreiding zelfs worden bevorderd en een meer gelijkmatiger watertemperatuur worden verkregen. Wanneer de kunstmatige infiltratie op de Veluwe zodanig wordt ingericht dat de verblijftijden lineair variëren tussen een minimum waarde T_m en een maximum waarde $T_m + n \cdot 365$ dagen, met n als geheel getal, dan kan een nagenoeg konstante temperatuur van het kunstmatige grondwater worden verkregen. In de duinen zou de verblijftijd T_a van gemiddeld 60 dagen lineair tussen 30 en 90 dagen kunnen variëren, waarmede de temperatuur fluktuatie

$$\Delta \tau = \tau_c \sin \omega(t - t_0 - \frac{T_a}{\mu} \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}) = \tau_c \sin \omega(t - t_0 - 2,78 T_a)$$

wordt teruggebracht tot

$$\Delta' \tau = \int_0^1 \tau_c \sin \omega(t - t_0 - 2,78(30 + 60\theta)) d\theta$$

$$\Delta' \tau = \frac{\sin(\omega \cdot 2,78 \cdot 30)}{\omega \cdot 2,78 \cdot 30} \tau_c \sin \omega(t - t_0 - 2,78 \cdot 60)$$

$$\Delta' \tau = 0,69 \tau_c \sin \omega(t - t_0 - 167)$$

Tezamen met de demping door warmteuitwisseling reduceert dit de temperatuurvariatie met een faktor $0,84 \cdot 0,69 = 0,58$, d.w.z. bij een temperatuur van het te infiltreren water tussen 0 en 20 °C, een temperatuur van het teruggewonnen water tussen 4,2 en 15,8 °C.

In het infiltratiegebied mengt het kunstmatige grondwater in een hoeveelheid q_k zich nog met het natuurlijke van nuttige neerslag N afkomstige grondwater in een hoeveelheid q_n

$$q_k = \frac{\mu HL}{T_a} \quad q_n = NL$$

De laatstgenoemde hoeveelheid heeft een konstante temperatuur τ_a , waardoor de temperatuur amplitudo daalt met een faktor

$$\frac{q_k}{q_n + q_k} = \frac{1}{1 + \frac{NT_a}{\mu H}}$$

Voor de duinen geldt globaal $N = 0,4$ m/jaar waardoor met de reeds genoemde waarden deze faktor wordt

$$\frac{q_k}{q_n + q_k} = \frac{1}{1 + \frac{0,4 \cdot 60}{365 \cdot 0,25 \cdot 20}} = 0,987$$

Deze reductie is van weinig belang. Voor de duinwaterwinplaats als geheel kan zij echter aanzienlijk zijn. Voor het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noordholland geldt b.v.

$$q_k = 20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}, \quad q_n = 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$$

en

$$\frac{q_k}{q_n + q_k} = \frac{20}{10 + 20} = 0,67$$

De totaal bereikbare reductie in temperatuuramplitudo wordt hiermee $0,84 \cdot 0,69 \cdot 0,67 = 0,39$ waarmee de temperatuurfluktuaties tussen 0 en 20 °C voor het te infiltreren water worden teruggebracht tot waarden tussen 6,1 en 13,9 °C voor het afgeleverde water.

Literatuur

- Huisman, prof. ir. L. and Haaren, drs. F. W. J. van. *Treatment of water before infiltration and modification of its quality during its passage underground*. International Water Supply Association, Barcelona, 1966.
- Verruyt, ir. A. *On the damping of seasonal fluctuations of the temperature of infiltrated groundwater*. De Ingenieur 1966, pg. G 43-48.
- Rijkooort, P. J. *De indringingsdiepte van vorst in de bodem*. KNMI, De Bilt, 1960.